

SIMULACIÓN TERMO MECÁNICA DE VIGUETAS PRETENSADAS SOMETIDAS A ALTA TEMPERATURA

THERMO MECHANICAL SIMULATION OF PRESTRESSED BEAMS UNDER HIGH TEMPERATURE

Gonzalo Ruano^a, Virginia Quintana^a, Armando LaScala^b, Dora Foti^b

^aINIQUI (CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Avda. Bolivia 5159,
4400 Salta, Argentina, vquintana@unsa.edu.ar

^bPolitécnico de Bari, Department ICAR, Via Orabona, 4 – 70125 Bari, Italy

Palabras clave: Viguetas Pretensadas, Altas Temperaturas, Termo-mecánico, Simulación Numérica.

Resumen. En este trabajo se presenta un modelo numérico que permite simular el comportamiento mecánico de viguetas de hormigón pretensadas sometidas a alta temperatura. Para calibrar el modelo se utilizaron valores experimentales obtenidos de ensayos térmicos y termo-mecánicos realizados a un conjunto de viguetas. La modelación numérica, que incluye la simulación de la historia de temperatura en el tiempo y del problema termo-mecánico, permite reproducir los resultados experimentales obtenidos y analizar el comportamiento mecánico de las viguetas provocado por el efecto de la exposición a las altas temperaturas. A partir de este modelo, es posible analizar paramétricamente los efectos de las distintas variables mecánicas, geométricas y térmicas contribuyendo a un diseño eficiente de este tipo de viguetas.

Keywords: Pre-Stressed Beams, High Temperature, Thermo-Mechanical, Numerical Simulation.

Abstract. This work presents a numerical model that simulates the mechanical response of prestressed concrete beams subjected to high temperature. The model was calibrated through several thermal and thermo-mechanical tests over the beams. To reproduce the thermal and the mechanical behavior the non-stationary behavior was taken account. This model could be used to further analysis of mechanic, geometric or thermal variables not used in this work and contribute to an efficient design of this structures.

1 INTRODUCCIÓN

El empleo de hormigón pre-comprimido es indispensable en muchas situaciones de interés práctico y en especial en estructuras que poseen determinadas características geométricas como el caso de grandes luces. El comportamiento termo-mecánico de estos elementos estructurales presenta ciertas particularidades, y por ello deben estudiarse de manera específica.

El uso de métodos numéricos resulta útil para evaluar cómo afecta la variación de temperaturas y en particular las altas temperatura a diferentes fenómenos (Gao et al., 2013). En particular, el método de elementos finitos, es uno de los más utilizados para dar solución al análisis de sistemas estructurales complejos. Los resultados numéricos pueden ayudar a comprender los resultados experimentales y confirmar las conclusiones. En este sentido, los modelos numéricos pueden ser utilizados para diseñar y optimizar los elementos estructurales en análisis, con el fin de obtener un mayor rendimiento mecánico y térmico a un menor coste (Gao et al., 2013).

Ruano et. al (2018a) presentaron recientemente un modelo numérico que permite simular, de manera acoplada, el problema termo-mecánico en una pieza estructural de hormigón pre-comprimido con armadura pre-tesa en estado transitorio. En el análisis se tiene en cuenta la variación de las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón con respecto a la temperatura con el objetivo de analizar las tensiones internas en el hormigón como fuente principal del fenómeno “spalling”.

A partir del modelo mencionado en el párrafo anterior, los autores proponen la incorporación de un coeficiente de dilatación térmica variable con la temperatura (Eurocodigo, 2015) para simular el comportamiento termo-mecánico de viguetas pretensadas sometidas a altas temperaturas. El modelo es utilizado para simular los ensayos experimentales provistos por Foti (Foti, 2014). En cuanto a la modelización del ensayo térmico, las condiciones de contorno son simuladas considerando el fenómeno de convección a partir de un modelo simplificado. Los resultados experimentales se comparan con los resultados numéricos obtenidos y se observa una buena aproximación desde el punto de vista ingenieril.

Por otra parte, las predicciones obtenidas con el modelo de Elementos Finitos (EF) también permiten examinar en detalle la compleja distribución y evolución de las tensiones en el acero de refuerzo y el hormigón, lo que lleva a una mejor comprensión de las respuestas locales de las vigas de RC expuestas al fuego. Además, el modelo de EF presentado en este trabajo puede ser utilizado en forma directa para el diseño de seguridad contra incendios de vigas RC basado en el desempeño; también se puede emplear en estudios paramétricos destinados a desarrollar reglas de diseño simples (Ruano et. al, 2018a).

En trabajo se organiza de la siguiente manera: En la sección 1 se presentan los resultados experimentales obtenidos a partir de los ensayos realizados a viguetas pretensadas sometidas a alta temperatura. En la sección 2 se describe el diseño del modelo numérico desarrollado y finalmente, en la sección 3, se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas térmicas y termo-mecánicas aplicadas al comportamiento mecánico de las viguetas pretensadas. Por último, se detallan las conclusiones.

2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales se obtuvieron a partir de ensayos realizados en el Politécnico de Bari, Italia. Corresponden a viguetas de hormigón pre-tensado sometidas a carga térmica

dentro de un horno. Se midieron las temperaturas dentro la probeta mediante termocuplas y además la flecha provocada por el calentamiento, resultados que fueron publicados parcialmente en Foti, (2014). Los ensayos corresponden a ocho especímenes que fueron calentados dentro de un horno eléctrico hasta alcanzar temperaturas de hasta 500°C en donde se ubica la armadura inferior. La Figura 1 muestra las mediciones experimentales de temperatura en varias posiciones y flecha al centro.

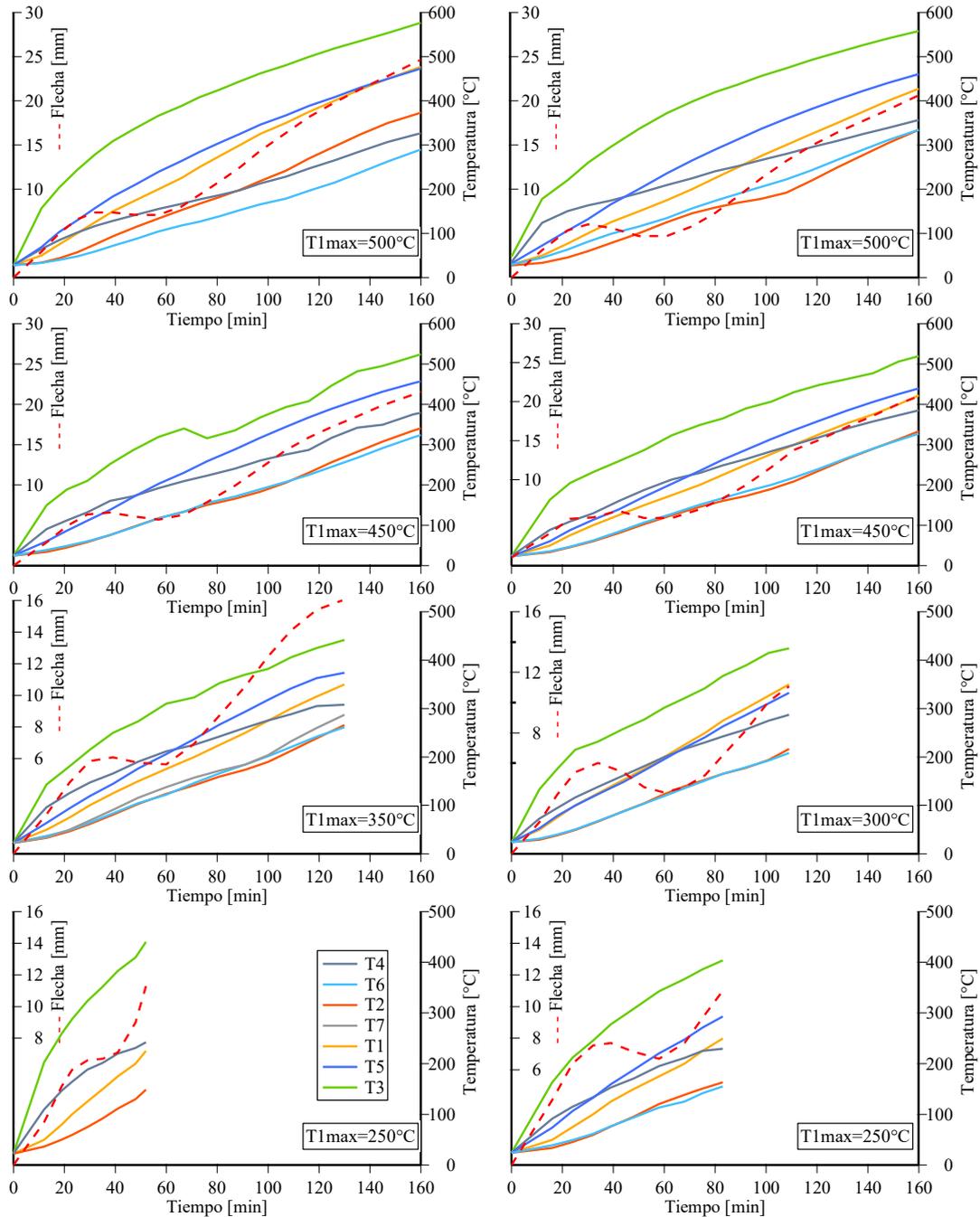


Figura 1. Resultados experimentales de ensayos a viguetas de hormigón pre-tensado sometidas a diferentes cargas térmicas: (- - -) Flecha (—) Temperaturas

3 MODELIZACIÓN NUMÉRICA

El hormigón pre-comprimido sometido a cargas térmicas y mecánicas puede ser tratado teniendo en cuenta las deformaciones del acero adquiridas en la etapa de pre-tensión considerando que la deformación del acero surge de la compatibilidad de deformaciones más una componente inicial del estado previo (pretensado). De esta manera, el acero y el hormigón no comparten la misma deformación. Bajo estas suposiciones se desarrolla el siguiente modelo.

Por otra parte, para hormigones expuestos a altas temperaturas existen tres problemas que interactúan entre sí: el proceso de daño térmico, el problema mecánico y el problema térmico. El modelo numérico tomado como base para este trabajo (Ruano et al., 2016) desprecia los efectos de la interacción del problema térmico-daño térmico y por ello plantea una solución desacoplada del problema “*stagger*”, algo habitual en la literatura. Esto es, en cada incremento de tiempo, se resuelve primero el problema térmico y luego, considerando constantes los valores de temperatura, y ya con el daño térmico calculado como función explícita de la temperatura máxima alcanzada, se resuelve el problema mecánico.

Concretamente, para reproducir el comportamiento del hormigón se utiliza el modelo de daño plástico modificado (Luccioni et al., 2003), habitualmente utilizado para simular el comportamiento de materiales friccionales (del tipo hormigón) sometidos a acciones térmicas. Este modelo deriva a partir de una generalización de la teoría clásica de la plasticidad (Luccioni et al., 1996) e incorpora una nueva variable interna, el daño térmico, que representa una medida del deterioro en las propiedades mecánicas del hormigón sometido a temperaturas elevada. Además, se asume que las propiedades térmicas del material dependen de la temperatura de acuerdo a la formulación presentada por Ruano et al. (2016) y Ruano et al. (2018b).

3.1 Modelo Constitutivo

El modelo constitutivo utilizado considera un tensor de acoplamiento termo-elástico, que representa la tensión por unidad de temperatura inducida por la dilatación térmica restringida, y está dado por:

$$\beta_{ij}(\xi, \theta) = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta \partial \varepsilon_{ij}^e} = C_{ijkl}^s(\xi) \alpha_{kl}(\theta) \quad (1)$$

donde $\alpha_{kl}(\theta)$ representa el tensor de dilatación térmica que en el caso isótropo se escribe como $\alpha_{kl}(\theta) = \alpha(\theta) \delta_{kl}$ donde α es dependiente de la temperatura y c_k es el calor específico por unidad de volumen o cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura en un grado.

El hormigón armado/pretensado es considerado como un material compuesto, formado por matriz de hormigón y fibras de acero largas (Ruano et al., 2016). La teoría de mezclas de sustancias básicas se basa principalmente en la hipótesis de compatibilidad de deformaciones (Truesdell, C.; Toupin, 1960), esto es:

$$(\varepsilon_{ij})_{FRC} = (\varepsilon_{ij})_{H^0} = (\varepsilon_{ij})_{A^0}^* \quad (2)$$

donde $(\varepsilon_{ij})_{A^0} = (\varepsilon_{ij})_{A^0}^P + (\varepsilon_{ij})_{A^0}^*$, con $(\varepsilon_{ij})_{A^0}^P$ término adicional para incorporar las deformaciones del pretensado.

3.2 Propiedades de los materiales

Se considera un comportamiento no lineal del material desde el punto de vista mecánico y térmico. Además, se considera la influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas (módulo de elasticidad del acero $E_{A^{\circ}}$, módulo de elasticidad del hormigón $E_{H^{\circ}}$ y tensión máxima del acero $\sigma_{A^{\circ}}$). Se asume que las propiedades térmicas del hormigón (calor específico C_{Esp} , conductividad $K_{H^{\circ}}$ y densidad $\rho_{H^{\circ}}$) y también el coeficiente de dilatación térmica ($\alpha_{H^{\circ}}$) varían con la temperatura de acuerdo al Eurocodigo (2015), tal como se muestran en Figura 2.

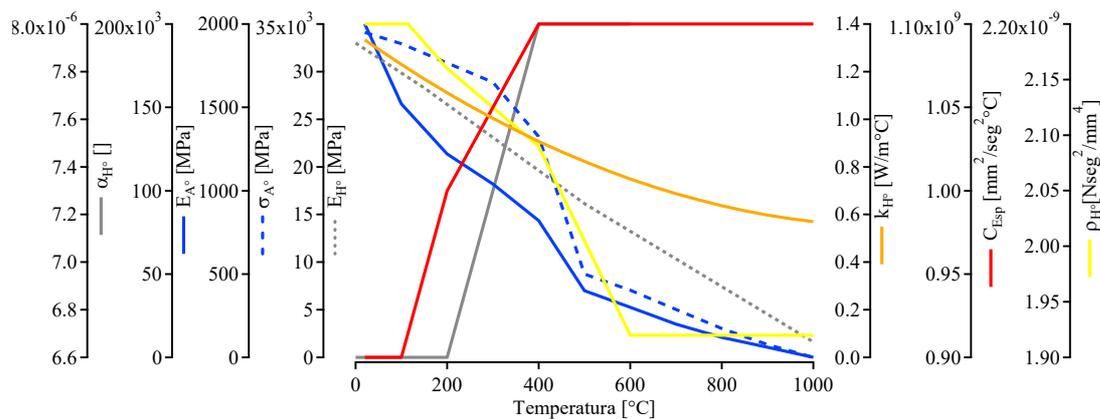


Figura 2. Propiedades térmicas del hormigón en función de la temperatura. En el orden de izquierda a derecha:

$$\alpha_{H^{\circ}}, E_{A^{\circ}}, \sigma_{A^{\circ}}, E_{H^{\circ}}, K_{H^{\circ}}, C_{Esp} \text{ y } \rho_{H^{\circ}}$$

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

4.1 Simulación Numérica de los Ensayos Térmicos

Se presentan a continuación las simulaciones y calibraciones llevadas a cabo en función de los datos experimentales provistos por el departamento ICAR Politécnico de Bari, Italia. Algunos de los mismos pueden consultarse en la publicación de Foti, (2014), y otros fueron provistos por los propios investigadores en el marco de un convenio de colaboración.

La Figura 3 muestra un resumen de la geometría y malla utilizadas para la simulación térmica y para la termo-mecánica, considerando las particularidades del problema tratado. Se observa la sección transversal de la pieza, las dimensiones, las cargas y los puntos de medición experimental, entre otros parámetros.

4.2 Geometría y malla

Se generó una malla de elementos rectangulares, ver Figura 3(h), para describir la geometría de la sección transversal de la viga y los puntos donde se midieron experimentalmente las temperaturas (puntos 1 a 6 de la Figura 3(h)). Los puntos 1 y 2 corresponden a las ubicaciones de las mediciones en la armadura inferior y superior respectivamente, los puntos 3 y 4 a las caras inferior y superior y los puntos 5 y 6 a mediciones ubicadas a 5mm del borde inferior y superior.

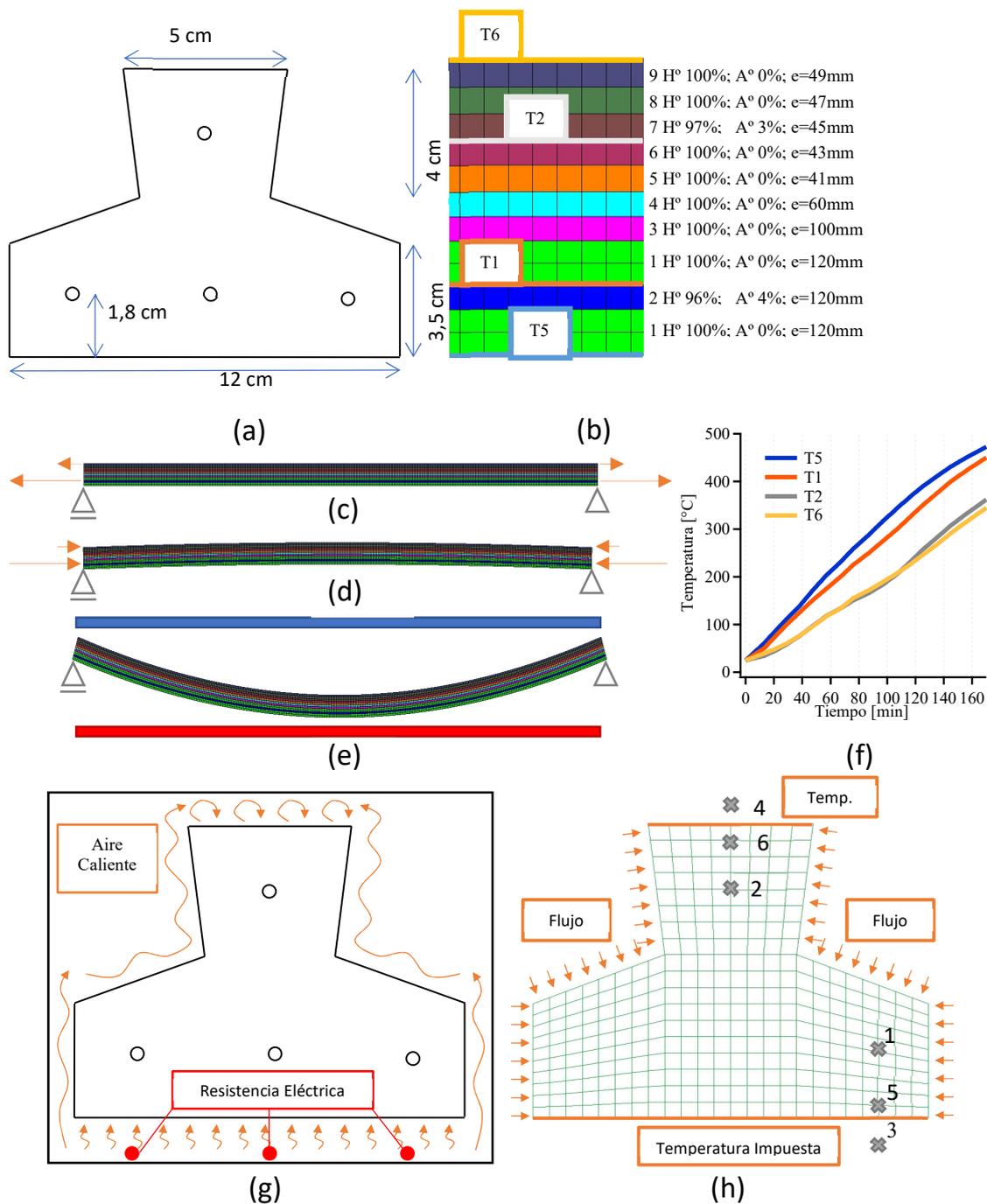


Figura 3. Geometría y malla de EF. (a) Sección transversal. (b) Malla EF problema termo-mecánico. (c) (d) y (e) Proceso de Pretensado de materiales. (e) Cargas. (f) Temperaturas medidas. (g) Fenómeno de Convección. (h) Malla de EF y Condiciones de Borde del problema térmico.

4.3 Flujo de calor y Condiciones de borde

De los ensayos sabemos que la presencia de aire alrededor de la vigueta y provoca fenómenos de convección que calienten la estructura en la superficie (ver Figura 3(g)). Esta

condición se incorpora en el modelo numérico asumiendo un flujo de calor variable en los bordes. En este trabajo se considera válida la convección modelada mediante la ley de Newton, la cual describe al flujo de calor como:

$$q = h(T_w - T_a) \quad (3)$$

donde h es el coeficiente de convección, T_w la temperatura del contorno del cuerpo y T_a la temperatura del fluido que envuelve al cuerpo. Para este caso particular se adopta $T_a = T_a(t)$ donde la variación evoluciona según los registros medidos en T3 y T4 de los ensayos (ver Figura 3(h), temperaturas inferior y superior de la cámara de ensayos). Se adopta $h = 0.060 \text{ N}/(\text{seg} \cdot \text{K} \cdot \text{mm})$ equivalente a $60 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, valor que se encuentra dentro de los rangos de valores para gases en movimiento (entre 15 y $250 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$) (Zienkiewicz and Taylor, 1994).

Se asume que el aire caliente rodea a la vigueta y que las caras inferior y superior de la vigueta son las de mayor incidencia del flujo de calor. En cercanía a la fuente de calor se estima una temperatura más alta, T3 en este caso. Luego, el aire caliente asciende y se concentra en la parte superior de la cámara del horno, en esa zona se considera que el aire alcanza la temperatura de T4. Para el talud y los laterales de la cabeza se adoptan valores menores a los de T4 pues en esa zona el aire estaría en circulación. Se destaca que, las mediciones de temperatura son las que evidencian fenómenos de convección, ya que T4 siendo el punto más alejado de la fuente de calor presenta valores de temperatura superiores a otros cercanos a la fuente de calor.

4.4 Resultados Temperatura

Para corroborar los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones térmicas, se comparan los resultados en los puntos donde la temperatura fue medida y registrada. En la Figura 4 se muestran los resultados para la viga cuya armadura inferior llegó a 300°C ($T_{1\text{max}}=300^\circ\text{C}$ de la Figura 1). Los colores están en correspondencia con el punto registrado (se usa el mismo color para el punto experimental y la simulación numérica).

Los valores presentados en la Figura 4 son muy acertados pues son las que se usaron para calibrar la estrategia de calentamiento por convección.

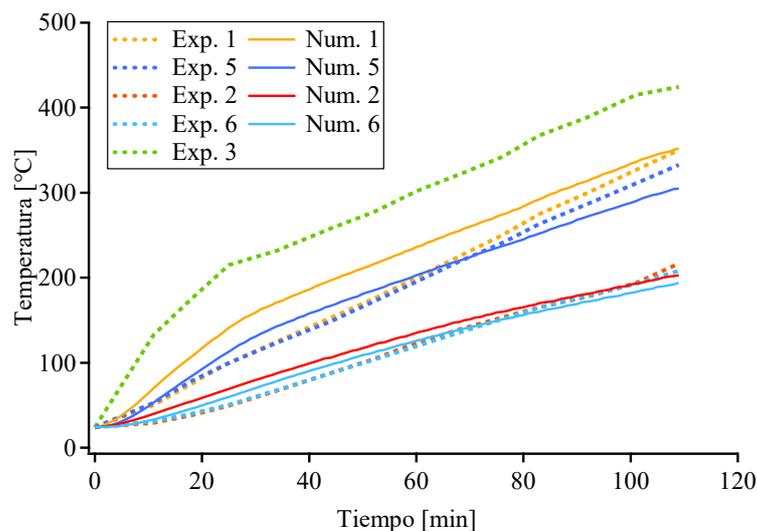


Figura 4. Comparación Numérico - Experimental espécimen T1max=300.

5 PROBLEMA TERMO MECÁNICO

En esta sección se reproducen los efectos mecánicos provocados por la carga térmica. Es decir, se reproduce la flecha alcanzada por acción del aumento de temperatura. No es la intención de este caso reproducir el problema térmico sino ver los efectos que provoca el aumento de temperatura. Además, como se trata de elementos de hormigón pretensado se debe reproducir el proceso constructivo que introduce las tensiones de pre-compresión en el hormigón, como se dijo anteriormente.

5.1 Geometría, malla y condiciones de borde

Las simulaciones realizadas corresponden a casos 2D, en estado plano de tensiones. Para esta situación la malla representa la viga de 2800mm de longitud que es sometida en principio al proceso de pretensión, luego a la carga mecánica debida al peso propio y finalmente a la carga térmica que provoca aumento de la flecha. En Figura 3(c) se muestra la geometría inicial de la viga, la luz es de 2800mm. En Figura 3(d) se puede ver la contra flecha que se obtiene cuando el acero le transmite la pre compresión al hormigón. Las tensiones que se obtienen en las fibras inferior y superior del hormigón coinciden con los valores informados experimentalmente (Foti, 2014). En Figura 3(e) se puede ver una instancia de la flecha obtenida por acción de la carga térmica. El resumen de los materiales usados en las simulaciones numéricas y las condiciones de borde se pueden ver en la Figura 3(b), se informa la participación volumétrica de los materiales y el espesor de los elementos ya que este responde al perfil transversal de la viga.

5.2 Propiedades termo mecánicas usadas

Las simulaciones de este problema también consideraron no linealidad material, dado que hay propiedades mecánicas que dependen de la temperatura alcanzada. Es sabido que en el hormigón cuando aumenta la temperatura, lo primero que se modifica es el módulo de elasticidad y el acero también sufre el mismo efecto. Por ello, se siguieron las recomendaciones dadas en el Eurocodigo, (2015), las cuales fueron mostradas en la Figura 2.

5.3 Resultados Obtenidos

Respecto del proceso de pre tensado se comparan los valores de las tensiones en las fibras inferiores y superiores de las viguetas, ver Tabla 1.

La simulación numérica del proceso de puesta en tensión de la armadura y luego de cortar los cables arroja las siguientes tensiones en los puntos de Gauss más próximos.

Tensión	Experimental [MPa]	Numérico [MPa]
Fibras superiores	4.7399	4.660987
Fibras inferiores	8.2167	8.535851

Tabla 1. Valores de pretensión numéricos y experimentales en viga.

Estos valores numéricos son muy cercanos a los reportados experimentalmente. Por lo que el proceso de pre tensión estaría bien modelado.

En la Figura 2, se observa la función que describe el coeficiente de expansión térmico del hormigón con el aumento de temperatura (Eurocodigo, 2015), este parámetro es el

correspondiente a un material calcáreo. Esta propiedad es crucial para la simulación numérica ya que tiene una influencia marcada en la respuesta tiempo-flecha. Se realizaron pruebas para estudiar la sensibilidad de este parámetro (no mostradas en este trabajo) que arrojaron valores muy disímiles para pequeñas variaciones.

La Figura 5, muestra la comparación de los valores obtenidos numéricamente vs. los obtenidos experimentalmente. En las curvas experimentales, se distinguen tres zonas principales. Inicialmente se produce un aumento lineal de la flecha con el aumento de temperatura. Luego se desarrolla un llano en el que la flecha no aumenta y finalmente se observa un aumento de la flecha; hacia el final del ensayo se observa que la flecha crece, pero en menor proporción. Numéricamente se reproduce este comportamiento de manera bastante razonable. La parte inicial de la curva numérica se ajusta bastante bien al experimento. Llegando a la zona denominada “llano” numéricamente sí se tiene un cambio en el comportamiento global de la estructura pues se obtiene una flecha que crece en menor medida que en la primera zona. Sin embargo, no se ha podido reproducir mejor el experimento. Esto podría deberse a que algún fenómeno no esté siendo considerado como ser una caracterización de dilatación térmica sobre materiales secos que no tienen en cuenta la humedad presente en las estructuras reales. La tercera parte de la curva también se aproxima a la medición experimental. Numéricamente incluso se obtuvo una disminución de la tasa de crecimiento de la flecha. Esta zona final del ensayo es muy sensible a la dilatación térmica que se use.

Una estructura con carga de pretensión corresponde a un sistema auto-equilibrado. Cuando el hormigón de la matriz es calentado este se expande, provocando cambios en el comportamiento que se suman al estado de tensión anterior generando cambios de tensiones complejos ya que no toda la sección transversal ni tampoco en toda la altura se calienta de manera pareja. Esto sumado a la sección transversal con forma de T invertida provoca que la estructura se comporte de una forma no intuitiva. Hasta el momento, con las suposiciones realizadas en cuanto al comportamiento térmico y termo-mecánico, se ha podido reproducir de manera razonable el comportamiento observado numéricamente.

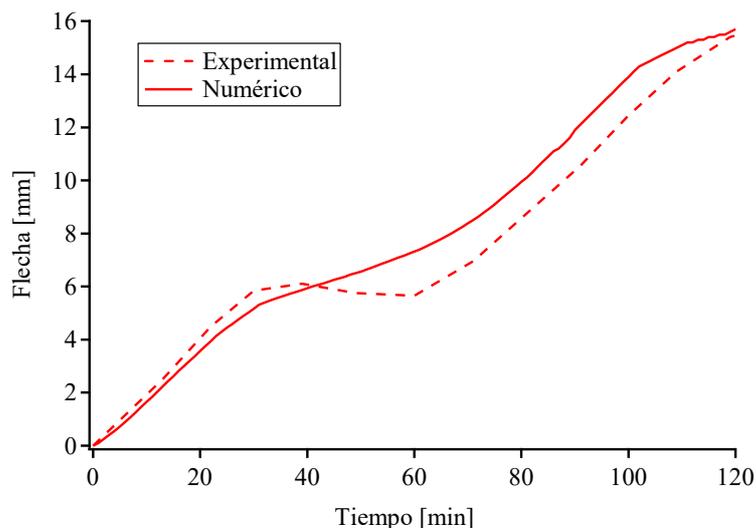


Figura 5. Comparación numérico-experimentales del problema termo-mecánico.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la comparación de resultados experimentales y numéricos de viguetas de hormigón pretensado sometidas a una historia de temperatura. La simulación se realiza considerando comportamiento no lineal, dependiente de la temperatura, de las propiedades térmicas y las mecánicas. La novedad de este trabajo es considerar que el coeficiente de dilatación térmica también es dependiente de la temperatura. La simulación térmica y la termo-mecánica arrojan resultados muy similares a las mediciones experimentales. Se pueden destacar que las condiciones de borde del problema térmico son cruciales para poder reproducir acertadamente las mediciones experimentales dentro de la vigueta. En esta propuesta se consideró que la convección introduce calor por el contorno de la vigueta. La influencia del valor del coeficiente de dilatación térmica en lo que respecta a la flecha es notoria. Esta propiedad se consideró dependiente de la temperatura, valores constantes no arrojaron resultados satisfactorios. Como posibles mejoras se podrían plantear otras condiciones de borde para el problema térmico. Para el problema termo-mecánico se podría estudiar lo sucedido con el coeficiente de dilatación térmica en diferentes materiales cementicios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica PICT-2021-I-INVI-00172, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad Nacional de Salta a través del subsidio recibido por CIUNSa.

REFERENCIAS

- Eurocodigo (2015) Eurocode 2: Design of concrete structures. *Design of Structural Elements* 3: 334–394.
- Foti D (2014) Prestressed slab beams subjected to high temperatures. *Composites Part B: Engineering* 58. Elsevier Ltd: 242–250.
- Gao WY, Dai JG, Teng JG, et al. (2013) Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures* 52. Elsevier Ltd: 488–501.
- Luccioni B, Oller S and Danesi R (1996) Coupled plastic-damaged model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 129(1–2): 81–89.
- Luccioni BM, Figueroa MI and Danesi RF (2003) Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures. *Engineering Structures* 25(6): 729–742.
- Ruano G, Isla F, Luccioni B, et al. (2016) Influencia de Altas Temperaturas en el Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibras. *Mecánica Computacional* 34(36): 2463–2481.
- Ruano G, Nallim L and Oller S (2018) Simulación Termo-Mecánica de Estructuras de Hormigón Pre-Comprimido con Armadura Pre-Tesa. *Mecánica Computacional* 36(30): 1449–1463.
- Ruano G, Isla F, Luccioni B, et al. (2018) Steel fibers pull-out after exposure to high temperatures and its contribution to the residual mechanical behavior of high strength concrete. *Construction and Building Materials* 163. Elsevier Ltd: 571–585.
- Truesdell, C.; Toupin R (1960) *The Classical Field Theories. Handbuch Der Physik.*
- Zienkiewicz O and Taylor R (1994) *El Método de Los Elementos Finitos Volumen 1.*